

Samenvatting

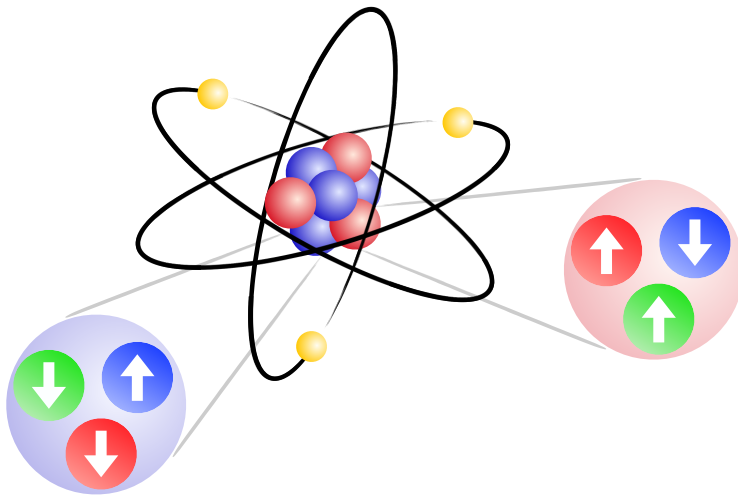
Dit proefschrift representeert onderzoek dat is gedaan in het veld van de elementaire deeltjesfysica. Hoewel het een fundamentele wetenschap is en weinig van doen heeft met het alledaagse leven, richt het zich wel op vragen die tot de verbeelding van velen zullen spreken, zoals “Waar is alles uit opgebouwd?”, of “Wat houdt alles bij elkaar?”. Juist omdat iedereen zich dit soort dingen wel eens afvraagt, is deze samenvatting gericht op een breed publiek.

Het doel van deze samenvatting is dan ook om de lezer een klein inzicht te verschaffen in de wereld van de elementaire deeltjes en de bescheiden bijdrage die dit proefschrift daaraan levert.

Het Standaardmodel

Hoewel het idee dat alle materie is opgebouwd uit kleine bouwstenen al duizenden jaren oud is, werden de eerste experimentele bewijzen hiervoor pas in de negentiende eeuw geleverd. De ontdekkingen volgden elkaar snel op en momenteel zijn er meer dan honderd verschillende soorten bouwstenen bekend. Deze deeltjes worden *atomen* genoemd en zijn ongeveer een miljoen keer zo klein als de dikte van een haar.

Met de ontdekking van het atoom leek de zoektocht naar de meest fundamentele bouwstenen van de natuur tot een einde te zijn gekomen. Het was dan ook een grote verrassing toen experimenten rond het begin van de twintigste eeuw aantoonde dat atomen zelf ook weer bestonden uit nog kleinere deeltjes. Ieder atoom bleek te bestaan uit een positief geladen kern, omringd door een wolk van negatief geladen deeltjes, genaamd *elektronen*, elk met een elektrische lading van -1 . De atoomkern is op zijn beurt weer opgebouwd uit *protonen* en *neutronen*. Het proton heeft een elektrische lading van $+1$, precies tegenovergesteld aan dat van een elektron. Neutronen zijn, zoals de naam doet vermoeden, neutraal en hebben geen elektrische lading. Omdat atomen als geheel elektrisch neutraal zijn, moeten ze dus net zoveel protonen als elektronen bevatten. De precieze hoeveelheid protonen (en dus ook elektronen) in een atoom bepaalt over wat voor soort atoom het gaat. Een heliumatoom bevat bijvoorbeeld twee protonen en twee elektronen, terwijl een ijzeratoom bestaat uit zesentwintig protonen en elektronen. Het aantal neutronen in een atoom



Figuur 1 Een schematische weergave van een atoom. Elektronen (de gele bollen) cirkelen rond de kern die protonen (de rode bollen) en neutronen (de blauwe bollen) bevat. The up- en down-quarks (de bollen met omhoog en omlaag wijzende pijlen) zijn zichtbaar in de vergrootte afbeeldingen van het proton en neutron.

kan variëren, wat leidt tot verschillende zogenaamde isotopen.

Ondanks dat het hebben van slechts drie fundamentele bouwstenen erg elegant was, bleken protonen en neutronen zelf ook weer te bestaan uit kleinere deeltjes. Deze deeltjes worden *up-quarks* en *down-quarks* genoemd en hebben een elektrische lading van respectievelijk $+2/3$ en $-1/3$. Een proton is opgebouwd uit twee up-quarks en een down-quark, terwijl een neutron twee down-quarks bevat, maar slechts een enkele up-quark. Een grafische weergave van een atoom is te vinden in figuur 1.

Buiten de elektrische lading blijken de quarks nog een extra soort lading te dragen: *kleurlading*. Ondanks de ietwat verwarrende naam heeft deze lading niks te maken met een daadwerkelijke kleur. Waar elektrische lading in twee verschillende vormen voorkomt (positief en negatief), zijn er drie mogelijke kleurladingen, die aangeduid worden met *rood*, *groen* en *blauw*. Net zoals een positief geladen deeltje en een negatief geladen deeltje samen neutraal zijn, vormen een rood, een groen en een blauw geladen deeltje samen een kleur-neutraal geheel (ook wel *wit* genoemd). De drie quarks in een proton (of in een neutron) hebben alledrie een andere kleur, dus protonen (en neutronen) hebben netto geen kleurlading. Alleen kleur-neutrale deeltjes, zoals protonen en neutronen kunnen direct worden geobserveerd.

Voor zover bekend zijn up-quarks, down-quarks en elektronen fundamentele materiedeeltjes: ze kunnen niet meer verder worden opgedeeld in kleinere deeltjes. Er is nog één extra materiedeeltje, genaamd het *elektron-neutrino*, dat hier verder niet van belang is, maar alleen wordt genoemd voor de volledigheid. Alle bekende materie is uiteindelijk opgebouwd uit deze vier elementaire deeltjes.

Het bestaan van de vier materiedeeltjes wordt voorspeld door een theorie die werd opgesteld rond 1967 en die de ietwat hooghartige naam *het Standaardmodel* draagt. Het Standaardmodel voorspelt verder nog twee exacte kopieën van elk van de vier materiedeeltjes, met als enige verschil dat deze kopieën een grotere massa hebben. Ieder van deze drie collecties, elk bestaand uit vier materiedeeltjes, wordt een *generatie* genoemd.

Buiten het bestaan van de materiedeeltjes, beschrijft het Standaardmodel ook de krachten die tussen deze deeltjes werken. Er zijn drie krachten binnen het Standaardmodel: *elektromagnetisme*, de *sterke kernkracht* en de *zwakke kernkracht*. De vierde en laatste kracht die bekend is, de zwaartekracht, maakt geen deel uit van het Standaardmodel. Deeltjes kunnen alleen worden beïnvloed door een bepaalde kracht als ze een specifiek soort lading bezitten. Zo worden deeltjes alleen beïnvloed door de elektromagnetische kracht als ze een elektrische lading hebben en alleen door de sterke kernkracht als ze een kleurlading hebben.

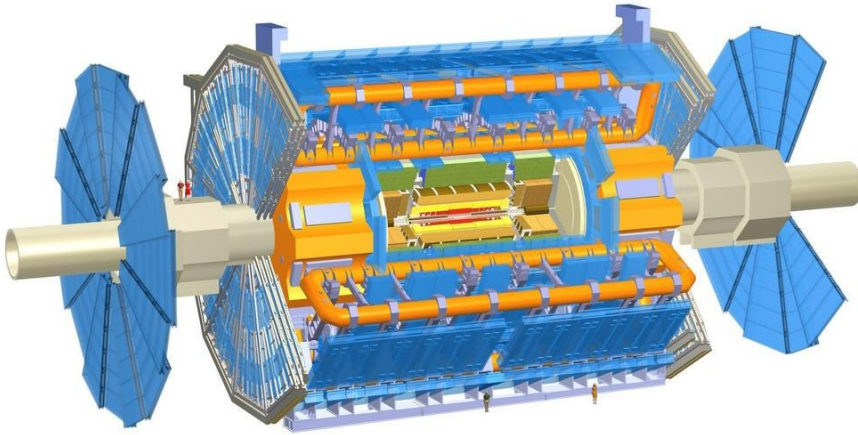
De krachten tussen de materiedeeltjes worden overgebracht door krachtdragende deeltjes. De krachtdrager van de elektromagnetische kracht is het *foton*, het deeltje waar ook licht uit bestaat. De sterke kernkracht wordt overgebracht door het *gluon*. De drie quarks in het proton worden dus bij elkaar gehouden doordat ze gluonen met elkaar uitwisselen en zo een aantrekkende kracht op elkaar uitoefenen. De sterke kernkracht heeft zijn naam niet voor niets: de kracht tussen twee quarks in een proton is ongeveer gelijk aan de kracht die nodig zou zijn om drie Afrikaanse mannetjesolifanten op te tillen. Het grote verschil tussen gluonen en fotonen is het feit dat fotonen zelf geen elektrische lading dragen, maar gluonen wel een kleurlading hebben. Dit betekent dat gluonen ook kracht uitoefenen op elkaar.

De derde kracht, de zwakke kernkracht, wordt overgebracht door zogenaamde *W-* en *Z-deeltjes* en is verantwoordelijk voor het radioactief verval van sommige atomen. Het laatste deeltje dat deel uitmaakt van het Standaardmodel is het *Higgsdeeltje*. Het Higgsdeeltje is geen materiedeeltje en ook geen krachtdrager, maar is verantwoordelijk voor een mechanisme waardoor de andere deeltjes aan hun massa komen.

Materiedeeltjes			Kracht- dragers	
I	II	III		
1968 u up-quark	1974 c charm-quark	1995 t top-quark	1979 g gluon	
1968 d down-quark	1968 s strange-quark	1977 b bottom-quark	1923 γ foton	
1897 e elektron	1936 μ muon	1975 τ tau	1983 W W-deeltje	
1956 ν_e elektron-neutrino	1962 ν_μ muon-neutrino	2000 ν_τ tau-neutrino	1983 Z Z-deeltje	2012 H Higgsdeeltje

Figuur 2 De deeltjes die deel uitmaken van het Standaardmodel en het jaar van hun ontdekking. De eerste drie kolommen zijn de drie generaties materie-deeltjes en in de vierde kolom staan de krachtdragende deeltjes.

Een schematische weergave van de volledige deeltjesverzameling die het Standaardmodel bevat, is te vinden in figuur 2. Alle deeltjes die het Standaardmodel voorspelt, zijn ook daadwerkelijk aangetroffen in experimenten. Daarnaast is er geen enkel elementair deeltje gevonden dat niet door het Standaardmodel werd voorspeld. Het Standaardmodel is dus een enorm succesvolle theorie. Toch kan het niet de ultieme theorie van het universum zijn. Een van de vele zowel theoretische als experimentele motivaties hiervoor is bijvoorbeeld het feit dat de zwaartekracht niet door het Standaardmodel wordt beschreven. De zoektocht naar nieuwe deeltjes, die niet door het Standaardmodel worden voorspeld, is een van de grootste uitdagingen van de moderne deeltjesfysica.



Figuur 3 De ATLAS detector. De detector is 46 meter lang en heeft een diameter van 25 meter. De protonen komen de detector binnen vanuit beide kanten en botsen in het midden. Om deze plek heen zitten meerdere lagen geavanceerde meetapparatuur, die in staat zijn om verschillende soorten deeltjes waar te nemen. De afgebeelde personen geven de schaal van de detector weer.

Zoeken naar deeltjes

De methode die men gebruikt om te zoeken naar nieuwe deeltjes is gebaseerd op de misschien wel bekendste formule uit de natuurkunde:

$$E = mc^2. \quad (1)$$

Hierin staat E voor energie, m voor massa en is c een constante waarde^[1]. Wat deze formule dus zegt, is dat energie en massa in elkaar omgezet kunnen worden aan de hand van een bepaalde wisselkoers, die gelijk aan c^2 blijkt te zijn. De omzetting van massa in energie vindt bijvoorbeeld plaats bij het opwekken van kernenergie, of in de ontploffing van een atoombom. Exact dezelfde wisselkoers geldt echter ook de andere kant op, dus energie kan ook worden omgezet in massa.

De huidige experimentele opstelling die gebruik maakt van dit principe staat in Genève en heet de Large Hadron Collider (LHC). De LHC is een 27 kilometer lange, cirkelvormige tunnel, die zo'n honderd meter onder de grond ligt. In deze tunnel worden protonen eerst in tegenovergestelde richting versneld totdat ze meer dan 11 000 keer per seconde rond gaan. Vervolgens laat men de protonen tegen elkaar aan botsen, waardoor de quarks (en gluonen) in de

¹Om precies te zijn, de lichtsnelheid, gelijk aan ongeveer een miljard kilometer per uur.

protonen interacties met elkaar kunnen aangaan. Vanwege de enorme hoeveelheid energie die in de beweging van de protonen zat, kunnen in deze interacties dan deeltjes ontstaan via vergelijking (1). Dit kunnen bekende deeltjes uit het Standaardmodel zijn, maar mogelijk ook nieuwe, tot nog toe onbekende deeltjes.

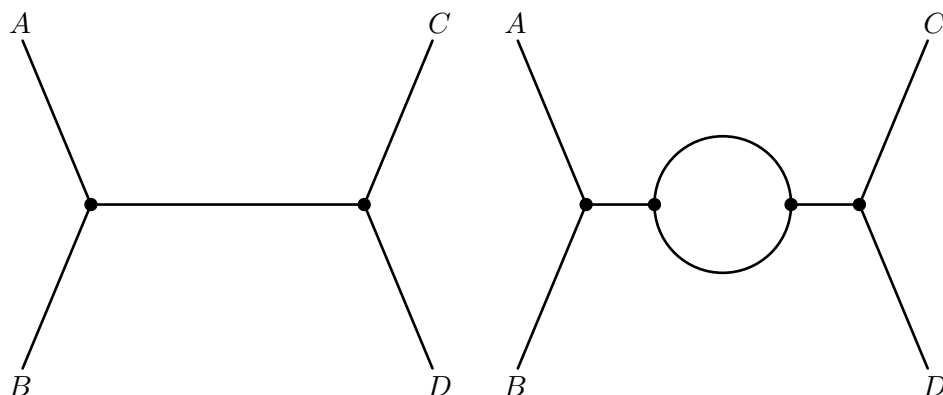
Bij de plek waar de protonen botsen zijn een hoop detectoren opgesteld (zie bijvoorbeeld figuur 3), zodat de eindproducten van de interacties die plaatsvinden kunnen worden gemeten. Er zit echter een addertje onder het gras: de meeste deeltjes vervallen in andere deeltjes voordat ze bij de detectoren aankomen. Het is dus onmogelijk om aan de hand van een gemeten eindtoestand met zekerheid te zeggen of er oorspronkelijk een deeltje uit het Standaardmodel, of een nieuw deeltje was gecreëerd.

Door heel veel botsingen te laten plaatsvinden, bij de LHC zo'n veertig miljoen per seconde, en het aantal keer te tellen dat een bepaalde eindtoestand wordt gemeten, kan echter wel de waarschijnlijkheid van die eindtoestand worden bepaald. Deze waarschijnlijkheid kan dan worden vergeleken met de voorspelling die het Standaardmodel doet. Indien de experimenteel gevonden waarschijnlijkheid van een specifieke eindtoestand groter is dan wat het Standaardmodel voorspelt, kan de conclusie worden getrokken dat er deeltjes moeten zijn ontstaan die ook tot die specifieke eindtoestand leiden, maar niet door het Standaardmodel worden beschreven.

Theoretische voorspellingen

Met behulp van het Standaardmodel kan de waarschijnlijkheid worden uitgerekend dat een specifiek proces voorkomt. Door alle waarschijnlijkheden van alle processen die tot een bepaalde eindtoestand leiden op te tellen, kan vervolgens de totale waarschijnlijkheid van die eindtoestand worden bepaald. Dit is te vergelijken met het gooien van twee dobbelstenen, waarbij de eindtoestand het totaal aantal ogen dat de dobbelstenen aangeven is. Door heel vaak twee dobbelstenen te gooien en te tellen hoe vaak bijvoorbeeld de eindtoestand 'tien ogen' voorkomt, kan de waarschijnlijkheid van die eindtoestand experimenteel worden bepaald.

Om deze waarschijnlijkheid theoretisch te voorspellen, moet de waarschijnlijkheid van elke mogelijkheid die tot deze eindtoestand leidt worden opgeteld. Er zijn in totaal drie mogelijkheden die tot 'tien ogen' leiden: $\{6, 4\}$, $\{5, 5\}$ en $\{4, 6\}$. De totale hoeveelheid mogelijke uitkomsten bij het werpen van twee dobbelstenen is gelijk aan $6 \times 6 = 36$, voor elk van de zes mogelijkheden van de eerste dobbelsteen kan de andere dobbelsteen immers zes verschillende waar-



Figuur 4 Twee Feynman diagrammen met mogelijke scenarios waarop twee inkomende deeltjes A en B de eindtoestand bestaande uit deeltjes C en D kunnen vormen.

den aannemen. In het geval van eerlijke dobbelstenen is de waarschijnlijkheid van elke mogelijkheid gelijk, zodat de totale waarschijnlijkheid van de eindtoestand ‘tien ogen’ gelijk moet zijn aan $3/36$, wat neerkomt op iets meer dan acht procent.

In de deeltjesfysica worden individuele processen vaak grafisch weergegeven in zogenaamde *Feynman diagrammen*. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in de linkerafbeelding in figuur 4, waar de deeltjes A en B aan de linkerkant de begintoestand voorstellen (de deeltjes die botsen) en de deeltjes C en D aan de rechterkant de eindtoestand. Door alle mogelijke Feynman diagrammen die tot dezelfde eindtoestand (de deeltjes C en D) leiden te tekenen en uit te rekenen, kan dan de totale waarschijnlijkheid van die eindtoestand worden voorspeld. Er is echter een complicatie: deeltjes kunnen tijdelijk opsplitsen in twee andere deeltjes, die vervolgens weer samensmelten tot één deeltje. Dit is bijvoorbeeld het geval in het rechterdiagram in figuur 4, dat dezelfde eindtoestand heeft als het linkerdiagram. Aangezien een gesplitst deeltje zelf ook weer zou kunnen splitsen, zijn er dus oneindig veel mogelijkheden die tot dezelfde eindtoestand leiden. Omdat het uitrekenen van oneindig veel diagrammen wel erg veel tijd zou kosten, lijkt dit een probleem te zijn.

De oplossing van dit probleem zit in het feit dat elke interactie tussen twee deeltjes (elk zwart bolletje in de diagrammen in figuur 4) de waarschijnlijkheid van een diagram verkleint. De precieze factor waarmee de waarschijnlijkheid wordt verkleind hangt af van het soort interacties. Voor interacties tussen quarks en gluonen, beschreven door de sterke kernkracht, geldt bijvoorbeeld dat de waar-

schijnlijkheid van een bepaald scenario ongeveer tien keer kleiner wordt voor elke twee interacties. Deze verkleiningsfactor, ook wel *koppelingsconstante* genoemd, wordt voor de sterke kernkracht aangegeven met het symbool α_s .

De oneindige verzameling scenarios die tot een specifieke eindtoestand leiden kan vervolgens worden geordend aan de hand van de hoeveelheid interacties (zwarte bolletjes) die per scenario voorkomen als

$$\text{Waarschijnlijkheid van eindtoestand} = c_0 + \alpha_s \times c_1 + \alpha_s^2 \times c_2 + \dots, \quad (2)$$

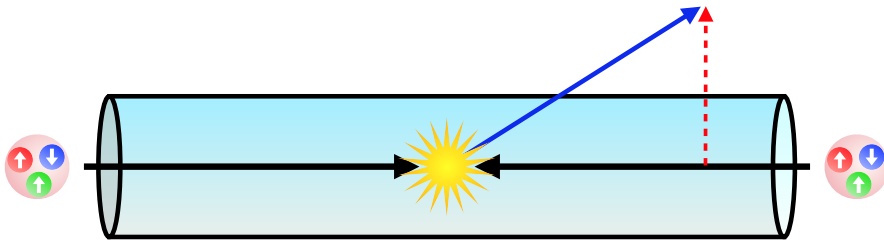
waar de puntjes aangeven dat de reeks zich tot in het oneindige voortzet. De eerste term aan de rechterkant, c_0 , is de waarschijnlijkheid dat er geen interactie plaatsvindt. In dat geval moet de eindtoestand dus gelijk zijn aan de begintoestand. De volgende term, $\alpha_s \times c_1$, is de gezamenlijke waarschijnlijkheid van alle diagrammen met precies twee interacties (zoals het linkerdiagram in figuur 4). Vanwege de verkleiningsfactor α_s is deze term ongeveer tien keer zo klein als de voorgaande term. De derde term, $\alpha_s^2 \times c_2$, staat voor de waarschijnlijkheid van alle diagrammen met precies vier interacties (zoals het rechterdiagram in figuur 4). Deze term bevat twee verkleiningsfactoren en is dus ongeveer $10 \times 10 = 100$ keer zo klein als de eerste term c_0 .

Omdat ieder volgende term in vergelijking (2) steeds kleiner is, kan de reeks op een bepaald moment worden afgekapt, mits men accepteert dat de voorspelling niet langer exact is, maar slechts een benadering. Als bijvoorbeeld alleen de termen c_0 en $\alpha_s \times c_1$ worden meegenomen, is de fout die wordt gemaakt proportioneel met de verkleiningsfactor van de derde term, ofwel $\alpha_s^2 \approx 1/100$. Dit laat de kracht van deze methode zien: Door slechts twee termen van een oneindige reeks uit te rekenen, kan het daadwerkelijke antwoord tot op 1% nauwkeurigheid worden benadert.

Meerdere metingen

Buiten de waarschijnlijkheid dat een bepaalde eindtoestand voorkomt kunnen experimenten ook eigenschappen van die eindtoestand meten. Een voorbeeld van een eigenschap die kan worden gemeten is de zogenaamde *transversale impuls*. Impuls is de hoeveelheid energie waarmee een deeltje zich in een bepaalde richting voortbeweegt. Het begrip ‘transversaal’ betekent dat de impuls wordt gemeten in de richting loodrecht op de richting waarin de protonen bij de LHC bewegen voordat ze tegen elkaar botsen, zie figuur 5.

De betekenis van impuls wordt duidelijker aan de hand van een voorbeeld uit het alledaagse leven: Er zit meer energie in een auto die met 50 kilometer per uur rijdt, dan in een auto die met 30 kilometer per uur rijdt. De eerste auto



Figuur 5 Een botsing tussen twee inkomende protonen (de zwarte pijlen). De impuls van een van de geproduceerde deeltjes is weergegeven met de blauwe pijl. De transversale impuls is de mate waarin deze impuls loodrecht van de botsende protonen af wijst, weergegeven door de rode, gestippelde pijl.

heeft dan dus een grotere impuls dan de tweede. In een volgeladen vrachtwagen die met 50 kilometer per uur rijdt zit weer meer energie dan in de auto die met 50 kilometer per uur rijdt, zodat de vrachtwagen een nog grotere impuls heeft.

In de natuur is (transversale) impuls een behouden grootte, het kan niet verloren gaan, maar alleen worden overgedragen van deeltje op deeltje. In het scenario afgebeeld in de diagrammen in figuur 4 moet de transversale impuls van de eindtoestand dus gelijk zijn aan de transversale impuls van de begin-toestand. Aangezien de impuls wordt gemeten in de richting loodrecht op de inkomende protonen, zou de transversale impuls van de begintoeestand (en dus ook de eindtoestand) per definitie gelijk aan nul moeten zijn. Hoe kan het dan toch zo zijn dat er een transversale impuls gemeten wordt bij de LHC?

Voordat de inkomende deeltjes als dusdanig worden beschouwd, dus voor de diagrammen in figuur 4 beginnen, kunnen deze deeltjes straling uitzenden. Deze straling bestaat uit zogenaamde *zachte* en *collineaire* deeltjes. Zachte deeltjes hebben heel weinig energie, zo weinig dat ze mogelijk niet eens gemeten worden door de detectoren. Collineaire deeltjes bewegen in exact dezelfde richting als een ander deeltje, zodat ze vaak ook niet individueel waargenomen kunnen worden door de detectoren. Door uitzending van deze straling kunnen de ingaande deeltjes dus een transversale impuls verkrijgen die vanwege impulsbehoud gelijk (maar tegengesteld) moet zijn aan de transversale impuls van de zachte en collineaire straling. De transversale impuls van de eindtoestand wordt dus eigenlijk volledig bepaald door de zachte en collineaire straling, ook al is die zelf erg lastig te meten.

Alle metingen die in dit proefschrift worden beschouwd, worden op een bepaalde manier beïnvloed door de zachte en collineaire straling.

De energie van de zachte en collineaire straling is vele malen lager dan de energie waarmee inkomende deeltjes tegen elkaar botsen en uiteindelijk de gemeten eindtoestand vormen. Gecombineerde metingen van zowel de waarschijnlijkheid van een bepaalde eindtoestand als de transversale impuls zijn dus gevoelig voor processen die plaatsvinden bij twee totaal verschillende energieën.

Het tegelijkertijd beschouwen van een proces met een kleine energie E_{klein} en een proces met een grote energie E_{groot} , levert een probleem op voor de theoretische berekening. Het blijkt dat de coëfficiënten c_1, c_2, \dots afhankelijk worden van de verhouding tussen de energieën, $E_{\text{groot}}/E_{\text{klein}}$. Om precies te zijn komt deze verhouding in elke coëfficiënt voor tot dezelfde macht als de macht van de koppelingsconstante α_s die bij die coëfficiënt hoort. Dus de coëfficiënt c_2 is bijvoorbeeld afhankelijk van de verhouding $(E_{\text{groot}}/E_{\text{klein}})^2$. Een typische waarde van deze verhouding kan bijvoorbeeld $E_{\text{groot}}/E_{\text{klein}} = 10$ zijn. In dat geval doet deze verhouding in elke term dus effectief de verkleinende werking van α_s teniet. Het gevolg hiervan is dan dat iedere term in vergelijking (2) weer ongeveer even groot is, zodat de reeks niet meer afgekapt kan worden.

Effectieve theorieën, factorisatie en hersommatie

Aangezien het probleem ontstaat doordat wordt geprobeerd om twee totaal verschillende processen tegelijkertijd te beschrijven, is de oplossing eigenlijk heel intuïtief: probeer de processen los van elkaar te beschouwen.

De meting van de transversale impuls wordt volledig bepaald door de zachte en collineaire straling en is totaal ongevoelig voor de hoog-energetische interactie tussen de botsende deeltjes. Deze meting kan dus net zo goed beschreven worden met een versimpelde versie van het Standaardmodel, waaruit alles dat te maken heeft met de energieke botsing van de inkomende deeltjes weg is gelaten. Wat er overblijft nadat alle (voor deze meting) onbelangrijke zaken zijn weggehaald, wordt een *effectieve theorie* genoemd.

Het principe van effectieve theorieën is ook in het alledaagse leven terug te vinden. Een bouwvakker hoeft bijvoorbeeld geen rekening te houden met de aantrekkingskracht tussen atomen om een huis te kunnen bouwen.

Door middel van een effectieve theorie kan de reeks in vergelijking (2) worden opgesplitst in twee verschillende reeksen, één die alleen afhangt van E_{klein} en één die alleen van E_{groot} afhangt. Een dergelijke opsplitsing wordt een *factorisatie* genoemd, aangezien de reeks wordt gesplitst in twee (onafhankelijke) factoren. Aangezien allebei deze factoren nu van slechts één energie afhangen, kunnen ze allebei apart van elkaar worden uitgerekend, zonder dat er grote verhoudingen tevoorschijn komen. Beide reeksen kunnen dan dus worden afgekapt na een bepaald aantal termen.

Uiteindelijk worden deze factoren weer samengevoegd om zo één resultaat te krijgen. Dit proces wordt *hersommatie* genoemd en zorgt er effectief voor dat de verhoudingen $E_{\text{groot}}/E_{\text{klein}}$ niet langer voorkomen in de coëfficiënten van de reeks in vergelijking (2). In plaats daarvan wordt de totale bijdrage van al deze verhoudingen in één keer in rekening gebracht door een overkoepelende coëfficiënt die tijdens de hersommatie wordt berekend.

In de praktijk blijkt het lang niet altijd eenvoudig te zijn om te bewijzen dat een factorisatie daadwerkelijk mogelijk is. Daarnaast is de procedure afhankelijk van de precieze meting (in dit geval de transversale impuls) die wordt gedaan. Voor elke variabele die men zou willen meten, moet er een nieuwe factorisatie worden bewezen.

Het onderzoek beschreven in dit proefschrift omvat de ontwikkeling van factorisaties en hersommaties van processen waarin twee of meerdere metingen tegelijkertijd worden beschouwd. De hierboven beschreven procedure wordt in deze gevallen aanmerkelijk complexer. Met elke meting kan in principe een andere energie gemoeid gaan, zodat er meerdere verhoudingen van energieën kunnen voorkomen in de coëfficiënten van de reeks in vergelijking (2). In dat geval moet worden bewezen dat de reeks kan worden gefactoriseerd in evenveel factoren als er metingen zijn. Het kan echter ook zo zijn dat een aantal metingen met dezelfde energie corresponderen, zodat een factorisatie in aan kleinere hoeveelheid factoren van toepassing is. Een van de belangrijkste opgaven bij het beschouwen van meerdere metingen is dan ook om uit te zoeken welke factorisatie er wanneer gebruikt moet worden.

In hoofdstuk 4 wordt de gelijktijdige hersommatie van twee metingen uitgevoerd, waarvan er eentje de transversale impuls is. Dankzij deze hersommatie is het mogelijk om tot een voorspelling te komen die geldig is voor alle energieën die deze metingen zouden kunnen hebben ten opzichte van elkaar en de energie van de inkomende, botsende deeltjes. De uiteindelijke voorspellingen zijn weergegeven in de drie-dimensionale grafieken in figuur 4.11. De resultaten in dit hoofdstuk zijn de eerste voorspellingen van de combinatie van de twee metingen die hier worden beschouwd. Deze specifieke combinatie van metingen is experimenteel bekeken en kan ook worden gebruikt om computersimulaties van botsingen te verbeteren.

Ook in hoofdstuk 5 wordt de factorisatie en hersommatie van twee metingen beschreven. Wederom is een van de metingen de transversale impuls. Hoewel het niet voor het eerst is dat de metingen in dit hoofdstuk tegelijkertijd worden gefactoriseerd en gehersommeerd, leidt de ontwikkelde procedure wel tot een accurater resultaat dan de al bestaande methodes. Dit kan worden toegepast op de productie van Higgs bosonen, of dat van hypothetische, zware, onbe-

kende deeltjes die niet door het Standaardmodel worden voorspeld.

De factorisatie die wordt afgeleid in hoofdstuk 6 is een meer algemene versie dan bekend in de literatuur en heeft vele toepassingen in het verschiet. Het is de eerste factorisatie die zowel het zachte als het collineaire gedrag van een bepaalde klasse van processen beschrijft.

Tot slot wordt in hoofdstuk 7 de vraag gesteld hoeveel metingen er eigenlijk tegelijkertijd gehersommeerd kunnen worden. Het idee achter deze vraag is het feit dat alle metingen uiteindelijk iets meten aan dezelfde set deeltjes (de eindtoestand). Na een bepaald aantal metingen zou het dus zo kunnen zijn dat alle eigenschappen van de eindtoestand al bekend zijn en dat nieuwe metingen geen nieuwe informatie meer verschaffen. Dit betekent dat er bij het doen van extra metingen geen nieuwe verhoudingen tussen energieën meer tevoorschijn komen in de coëfficiënten in vergelijking (2). Zodoende zal er dus ook geen hersommatie van deze extra metingen meer nodig zijn. De resultaten van dit hoofdstuk impliceren dat het hersommen van twee metingen een grote verbetering geeft ten opzichte van het hersommen van slechts één meting, een geruststellende conclusie gezien het onderwerp van de andere hoofdstukken in dit proefschrift. Daarnaast laat het resultaat zien dat het hersommen van verdere metingen een steeds kleiner voordeel oplevert.

Het onderzoek in dit proefschrift is kort gezegd dus gericht op het verbeteren van de precisie van de voorspellingen die het Standaardmodel doet. Door de waarschijnlijkheid van deze bekende processen met een grotere nauwkeurigheid te bepalen, wordt het hopelijk mogelijk om nieuwe, onbekende deeltjes waar te nemen. Immers, om een speld in een hooiberg te vinden moet men eerst exact weten hoe het hooi eruit ziet.